

УДК 504.43

О.М. СЕРІКОВА

Національний університет цивільного захисту України

О.О. СТРЕЛЬНИКОВА

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФАКТОРУ ЕВАПОТРАНСPIРАЦІЇ ПРИ
ЗМІНІ РІВНЯ ҐРУНТОВИХ ВОД МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ**

В роботі здійснено математичне моделювання зміни рівня ґрунтових вод (РГВ) з урахуванням впливу штучних покриттів поверхні ґрунту і евапотранспірації. Мета дослідження – підвищити точність прогнозів зміни рівня ґрунтових вод для підвищення екологічної безпеки міських територій, підтоплених ґрунтовими водами. Прогноз максимального рівня ґрунтових вод для міста Харкова, без врахування ефекту евапотранспірації на перспективу 50 років, свідчить, що на 1-й рік підйом рівня становитиме 0,03 м, а на 50-й рік – близько 1,5 м. З метою оптимізації водного балансу підземних вод для забезпечення екологічної безпеки підтоплених територій великого міста, на основі запропонованої математичної моделі було проведено балансування видаткових та прибуткових статей. Балансування відбувається при зниженні додаткового живлення в 2,4 рази, тобто додаткове живлення необхідно зменшити в середньому на 240 000 м³/добу, а також при збільшенні водовідбору з першого від поверхні водоносного горизонту в середньому в 15 разів, тобто при збільшенні водовідбору в межах м. Харків в середньому на 300 000 м³/добу. Також зроблено прогноз зміни РГВ із урахуванням дії евапотранспірації на перспективу 50 років. Під штучними покриттями на 1-й рік підйом рівня складе 0,05 м, а на 50-й рік – вже 2,56 м. На території, вільній від штучних покриттів РГВ буде стабілізований дією евапотранспірації. Таким чином, поширення площі штучних покриттів по території міста сприятиме зниженню дії евапотранспірації і стійкому підвищенню РГВ та розвитку підтоплення. Проведено оцінку адекватності запропонованої математичної моделі за фактичними даними моніторингу рівня ґрунтових вод. Оцінка адекватності проводиться на двох різних за ландшафтними умовами ділянках. Перша ділянка переважно розташована посеред приватного сектору та має вільну від покриттів поверхню. Друга ділянка практично повністю вкрита штучними покриттями. Результати розрахунків на моделі визначили тісний взаємозв'язок між розрахунковими та фактичними значеннями моніторингу рівнів підземних вод. Це свідчить про адекватність створеної математичної моделі реальним фізичним умовам.

Ключові слова: додаткове живлення, рівень ґрунтових вод, евапотранспірація, підтоплення, математичне моделювання зміни рівня ґрунтових вод.

Е.Н. СЕРИКОВА

Национальный университет гражданской защиты Украины

Е.А. СТРЕЛЬНИКОВА

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАКТОРА
ЭВАПОТРАНСPIРАЦИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УРОВНЯ ҐРУНТОВЫХ ВОД
ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ**

В работе проведено математическое моделирование изменения уровня ґрунтовых вод (УГВ) с учетом влияния искусственных покрытий поверхности почвы и

эвапотранспирации. Цель исследования – повысить точность прогнозов изменения уровня грунтовых вод для повышения экологической безопасности городских территорий, подтопленных грунтовыми водами. Прогноз максимального уровня грунтовых вод для города Харькова, без учета эффекта эвапотранспирации на перспективу 50 лет, свидетельствует, что на 1-й год подъем уровня составит 0,03 м, а на 50-й год – около 1,5 м. С целью оптимизации на основе предложенной математической модели водного баланса подземных вод для обеспечения экологической безопасности подтопленных территорий большого города, проведено балансирование расходных и приходных статей. Балансирование происходит при снижении дополнительного питания в 2,4 раза, то есть дополнительное питание необходимо уменьшить в среднем на 240 000 м³/сутки, а также при увеличении водоотбора из первого от поверхности водоносного горизонта в среднем в 15 раз, то есть при увеличении водоотбора в пределах г. Харьков в среднем на 300 000 м³/сут. Также сделан прогноз изменения УГВ с учетом действия эвапотранспирации на перспективу 50 лет. Под искусственными покрытиями на 1-й год подъем уровня составит 0,05 м, а на 50-й год – уже 2,56 м. На территории, свободной от искусственных покрытий УГВ будет стабилизирован действием эвапотранспирации. Таким образом, распространение площади искусственных покрытий по территории города будет способствовать снижению действия эвапотранспирации и устойчивому повышению УГВ и развитию подтопления. Проведена оценка адекватности предложенной математической модели по фактическим данным мониторинга уровня грунтовых вод. Оценка адекватности проводилась на двух различных по ландшафтными условиями участках. Первый участок преимущественно расположен посреди частного сектора и имеет свободную от покрытий поверхность. Второй участок практически полностью покрыт искусственными покрытиями. Результаты расчетов на модели определили тесную взаимосвязь между расчетными и фактическими значениями мониторинга уровней подземных вод. Это свидетельствует об адекватности созданной математической модели реальным физическим условиям.

Ключевые слова: дополнительное питание, уровень грунтовых вод, эвапотранспирация, подтопление, математическое моделирование изменения уровня грунтовых вод.

O.M. SIERIKOVA

National University of Civil Defence of Ukraine

O.O. STRELNIKOVA

A.M. Pidhorny Institute for Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine

EVAPOTRANSPIRATION FACTOR MATHEMATICAL MODELING IN GROUNDWATER LEVEL CHANGING PROCESS OF URBAN TERRITORIES

The mathematical modeling of groundwater level changing with influence of artificial surface covers and evapotranspiration factor has been developed in the paper. Objective of research is to improve the forecasts of groundwater level changing for environmental safety of urban areas flooded by groundwater. The prediction of maximum groundwater level altitude for the Kharkiv city, without taking into account the evapotranspiration effect on the 50 years perspective, indicates that for the 1st year the level rise will be 0,03 m, and for the 50th year near 1,5 m. In order to optimize groundwater balance using the proposed mathematical model for the ensuring ecological safety of urban flooded territories the

expense and profitable balance of groundwater parts have been provided. Balancing occurs by the additional groundwater replenishment reducing in 2,4 times, that means to reduce additional groundwater replenishment an average on 240,000 m³/day, and increase the groundwater extraction in 15 times, that corresponds an average 300,000 m³/day. Also, the forecast of groundwater level changing included evapotranspiration effect for the 50 years future has been provided in the paper. Under artificial covers for the 1st year, there will be 0,05 m of the level rising, and for the 50th year it will be 2,56 m. On the territory, free of artificial covers, groundwater level will be stabilized by the evapotranspiration action. Thus, the proliferation of artificial surfaces in the city will contribute reducing the evapotranspiration effect and groundwater level sustained increase and flood development. Adequacy evaluation of proposed mathematical model on the actual groundwater level monitoring data has been realized. The adequacy evaluation is carried out on two different landscaped areas. The first section is mainly located in the middle of the private sector, and has a free surface. The second section is practically completely covered with artificial covers. The calculation results on the model have determined the good correlation between the calculated and actual monitoring values of groundwater levels. This indicates the adequacy of proposed mathematical model to real physical conditions.

Keywords: additional groundwater replenishment, groundwater level, evapotranspiration, flooding, mathematical modeling of groundwater level changing.

Постановка проблеми

Для значної кількості міст України характерне систематичне підвищення середнього рівня ґрунтових вод (РГВ) на забудованих територіях та розширення ділянок підтоплення. За 2011-2014 рр. площа підтоплення території України становила 7,9 млн. га, а кількість затоплених населених пунктів становила 4702. Більше того, в 2018 році площа підтоплення становила 8,9 млн. га, а кількість затоплених поселень становила 4747. Цей список починається з великих міст України [1].

Підтоплення призводить до руйнування матеріалів підземних комунікацій, забруднення усього підземного простору міст, зокрема верхніх горизонтів підземних вод, виникнення болотистих ділянок і затоплення підземних приміщень у житлових будинках. Такі процеси провокують розвиток цілого ряду екологічно небезпечних біологічних та фізико-хімічних явищ: активного розмноження кровососних комах, появи аскомицетів, утворення отруйних випарів у повітрі, що шкідливо позначається на здоров'ї населення і спричиняє значні матеріальні збитки. Забезпечення екологічної безпеки територій, що зазнають підтоплення, шляхом попередження розвитку та ліквідації негативних наслідків цього процесу, є важливим завданням підтримання сталого розвитку міст.

На теперішній час залишаються актуальними завдання комплексної оцінки техногенного впливу великих міст на РГВ та прогнозування його зміни, враховуючи натурні дослідження та розроблення математичних моделей для уточненої оцінки підвищення рівня екологічної безпеки урбанізованих територій, що зазнають підтоплення.

Аналіз наукових досліджень показав, що у великих містах України насамперед відсутня необхідна моніторингова система контролю за режимом ґрунтових вод, що спричинено економічними труднощами. Тому оцінка та прогнозування розвитку процесу підтоплення останніх років на цих територіях значно ускладнюється. Методи та методики прогнозу підтоплення міських територій потребують розробки моделей, що враховують такі комплексні техногенні фактори, як штучні покриття, що зменшують транспірацію через рослини, випаровування з ґрунтових вод та зміну водного балансу підземних вод під впливом додаткового живлення і водовідбору з

грунтових вод. Таким чином, дослідження процесів та чинників зміни РГВ під час прогнозування максимального їх підняття, що дозволить кількісно оцінити ризик підтоплення, є актуальною науково-прикладною задачею у розрізі екологічної безпеки великих міст [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботах [2-4] надані загальні концепції антропогенного впливу на підземну гідросферу забудованих територій та методи боротьби з підтопленням.

Фактори, що впливають на розвиток підтоплення міст, були описані в роботах Яковлева Є.О., Щербака О.В., Ксенофонта Б.С., Таранова Р.А. та інш. [2, 4].

Яценко К.В., Алхаттер С., Сологаєв В.І., Парфентьев О.А. та інш. [3, 5] представили у дослідженнях методи прогнозування, моніторингу та розрахунку змін рівня ґрунтових вод.

Відомі вчені та фахівці, включаючи Яковлева Є.О. [4], Сологаєва В.І. [5], Чебанова О.Ю. [6] та інші розглядали динаміку рівня ґрунтових вод та розвиток процесу підтоплення міських та промислових територій.

Підтоплення та управління рівнем ґрунтових вод, управління поверхневим стоком висвітлено в роботах Jha A. K., Bloch R., Lamond J. [7], Bob M., Rahman N., Elamin A., Taher S. [8], Jiang Y., Zevenbergen C., Ma Y. [9] and others [10].

Відомі вчені та фахівці, зокрема Абрамов С.К., Дзекцер Ю.С. [11], Чебанов О.Ю. [12], Дегтярьов Б.М., Стрижельчик Г.Г. [13], Теліма С.В. [14], Яцик А.В. [15], Муфтахов А.Г. [16] та інші вивчали методи управління РГВ та боротьби з підтопленням міських та промислових територій. В даний час задачі інтегрованої оцінки техногенного впливу великих міст України на рівень ґрунтових вод та прогнозування його змін з урахуванням розробки поглиблених досліджень та математичних моделей для підвищення екологічної безпеки міських територій із загрозою підтоплення залишаються актуальними [1].

Мета дослідження

Мета дослідження – розроблення математичної моделі для уточненого прогнозу зміни рівня ґрунтових вод для підвищення екологічної безпеки міських територій, підтоплених ґрунтовими водами.

Викладення основного матеріалу дослідження

На прикладі м. Харкова для прогнозування рівневого режиму ґрунтових вод при зміні водогосподарських умов, розроблено математичну модель, що враховує істотні статті балансу: інфільтрацію атмосферних вод, додаткове живлення в ґрунтові води, транспірацію, випаровування, евапотранспірацію і водовідбір з підземних вод. На основі рівняння Муфтахова А.Ж. побудовано математичну модель, яка дозволила отримати розв'язок сформульованої задачі в замкнутому аналітичному вигляді (у вигляді рядів). Це дало можливість провести візуалізацію результатів і підтвердити попередньо отримані автором дані [17, 18] про вплив додаткового живлення на рівень ґрунтових вод з використанням традиційного інженерного підходу.

З метою створення математичної моделі обрано диференціальні рівняння для опису зміни РГВ та відповідні граничні умови.

При цьому прийняті такі припущення:

- зміна РГВ має усталений характер, про що свідчать дані багаторічних досліджень Геологічної партії в 3-х режимних водопунктах м. Харків;
- розглядаються ділянки з однорідними гідрогеологічними умовами вздовж одного з напрямків, що дозволяє використовувати рівняння плоскої фільтрації.

Для моделювання розглянуто рівняння фільтраційного напору у випадку плоскої фільтрації, яке може бути базовим для створення математичної моделі опису змін РГВ, якою можна врахувати фактори штучних покриттів та евапотранспірації:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

де h – рівень ґрунтових вод, м; x, y – координати, показані на рис. 1; γ – коефіцієнт анізотропії.

На території багатьох міст України значну площу займають штучні дорожні покриття і будівлі, що перешкоджають природним процесам інфільтрації атмосферних опадів, випаровування та транспірації. Тому при моделюванні зміни рівня ґрунтових вод враховано існування таких ділянок території, що частково покриті штучними покриттями, де вплив природних і техногенних факторів буде відбуватися лише на незабудованій поверхні цієї ділянки (рис. 1).

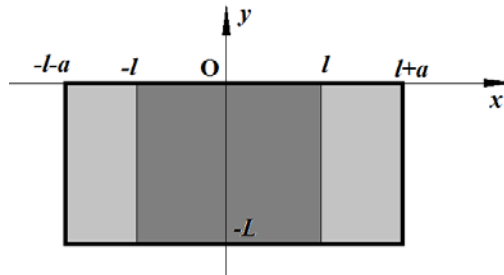


Рис. 1. Схема розрахункової області для визначення РГВ.

Припустимо, що на ділянках $[-l-a; -l]$ та $[l; l+a]$ відбувається вплив природних і техногенних факторів на зміну рівня ґрунтових вод; в той час як на ділянках $[-l; 0]$ та $[0; l]$ впливу на рівень ґрунтових вод не відбувається завдяки штучним покриттям (рис. 1). Тоді, враховуючи, що зовнішня нормаль на відрізку $[-l; l]$ при $y = -L$ співпадає з протилежним напрямком осі Оу, маємо таку граничну умову, що характеризує наявність штучних покриттів:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial y} \right|_{-l \leq x \leq l, y = -L} = 0.$$

На ділянках $[-l-a; -l]$ та $[l; l+a]$ відбувається інфільтрація, водовідбір, транспірація і випаровування, тому маємо

$$-\left. \frac{\partial h}{\partial y} \right|_{l \leq x \leq l+a, y = -L} = f_1 + s_1 - g_1 - d_1 - k_1,$$

де f_1 – додаткове живлення ґрунтових вод (прибуткова частина балансу ґрунтових вод); s_1 – кількість опадів, яка інфільтрується в ґрунтові води (прибуткова частина балансу ґрунтових вод); g_1 – інтенсивність транспірації (видаткова частина балансу ґрунтових вод); d_1 – інтенсивність випаровування (видаткова частина балансу ґрунтових вод); k_1 – водовідбір з ґрунтових вод (видаткова частина балансу ґрунтових вод).

Аналогічну умову ставимо на ділянці $[-l-a; -l]$ при $y = -L$, позначаючи відповідні параметри водного балансу з індексом 2. В подальшому використовуємо симетричну модель, тому вважаємо, що

$$f_1 = f_2; s_1 = s_2; g_1 = g_2; d_1 = d_2; k_1 = k_2.$$

Отримаємо

$$-\frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{l \leq x \leq -l-a, y = -L} = f_2 + s_2 - g_2 - d_2 - k_2.$$

Оскільки зміна рівнів ґрунтових вод та їх розповсюдження є локальними, і моделювання проводиться для обмежених ділянок міської території (промислових об'єктів, будівель і т. ін.) з однорідними гідрогеологічними умовами, можна прийняти, що боковий приплив і відтік рівні між собою, тому

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=l+a} = e_1(y) \\ \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=-l-a} = e_1(y) \end{cases}, \quad e_1(y) = \frac{2}{1 + (y/y_{50})^\tau}, \quad (2)$$

де τ – відносна мінливість потенційної транспірації; y_{50} – параметр, що характеризує висоту капілярного всмоктування води; y – глибина, де відбувається тиск вологи, який всмоктує. У розрахунках прийнято значення $\tau = 2,2$.

У подальших розрахунках прийнято, що $y_{50} = 3$, тобто вважалось, що $L = 6$ м. Якщо евапотранспірація не враховувалась, то значення L обговорюється окремо. Початковий рівень приймається за точку відліку, $h=0$:

$$h \Big|_{y=0} = 0.$$

Таким чином, сформульовано таку крайову задачу для визначення невідомої функції $h(x, y)$. Треба знайти розв'язок диференціального рівняння

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

при таких крайових умовах:

$$\frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{-l \leq x \leq l, y = -L} = 0, \quad (3)$$

$$-\frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{l \leq x \leq l+a, y = -L} = f_1 + s_1 - g_1 - d_1 - k_1, \quad (4)$$

$$-\frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{l \leq x \leq -l-a, y=-L} = f_2 + s_2 - g_2 - d_2 - k_2, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=l+a} = e_1(y), \\ \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=-l-a} = e_1(y), \end{cases} \quad (6)$$

де функція $e_1(y) = \frac{2}{1 + (y/y_{50})^\tau}$ визначена в (2).

Зауважимо, що неможливо побудувати одну систему базисних функцій для цієї крайової задачі з неоднорідними крайовими умовами на трьох межах. Тому в роботі запропоновано шукати невідому функцію $h(x, y)$ у вигляді суми двох доданків:

$$h(x, y) = h(x, y)_1 + h_2(x, y).$$

Кожній функції $h_i(x, y)$, $i=1, 2$ відповідає своя крайова задача, при чому в кожній з цих задач наявні однорідні граничні умови, що дає змогу побудувати системи незалежних базисних функцій. Такий засіб не лише дозволяє побудувати розв'язок сформульованої крайової задачі (1), (3)–(6), що враховує наявність штучних покриттів, інфільтрацію, випаровування та транспірацію, а також ефект евапотранспірації, але й дослідити окремо вплив штучних покриттів та ефект евапотранспірації. Так, крайова задача для функції $h_1(x, y)$ описує наявність штучних покриттів, інфільтрацію, випаровування та транспірацію, але не враховує ефект евапотранспірації в залежності від глибини. Цю задачу сформулюємо таким чином:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} + \gamma^2 \frac{\partial^2 h_1}{\partial y^2} = 0, \\ h_1 \Big|_{y=0} = 0, \\ \frac{\partial h_1}{\partial y} \Big|_{-l \leq x \leq l, y=-L} = 0, \\ -\frac{\partial h_1}{\partial y} \Big|_{-l-a \leq x < -l, y=-L} = f_1 + s_1 - k_1, \\ -\frac{\partial h_1}{\partial y} \Big|_{l < x \leq l+a, y=-L} = f_1 + s_1 - k_1, \\ \frac{\partial h_1}{\partial x} \Big|_{x=\pm(l+a)} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

де f_1 – додаткове живлення ґрунтових вод (прибуткова частина балансу ґрунтових вод); s_1 – кількість опадів, яка інфільтрується в ґрунтові води (прибуткова частина балансу ґрунтових вод); k_1 – водовідбір з ґрунтових вод (видаткова частина балансу ґрунтових вод).

Величина початкового РГВ є довільною.

Отримано значення зміни РГВ при незмінній евапотранспірації, що візуалізовано розрахунками для обмежених ділянок території м. Харків на рис. 2, де зображена функція $h_1(x, y)$. Отримані також значення зміни РГВ при змінній евапотранспірації, які зображені на рис. 3.

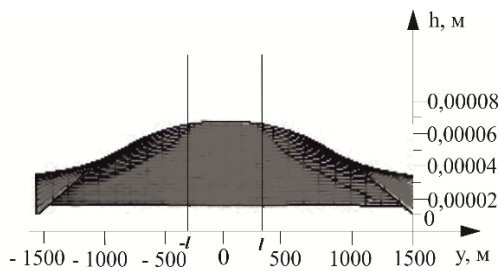


Рис. 2. Середньодобова зміна РГВ за профілем моделі, без врахування дії евапотранспірації.

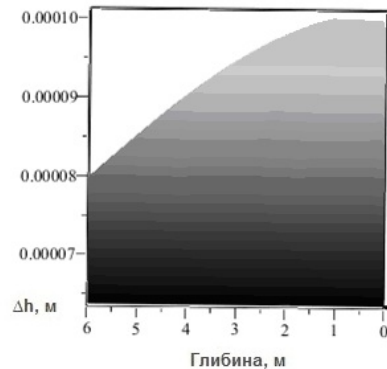


Рис. 3. Зміна РГВ при змінній евапотранспірації.

Розроблений прогноз максимально високих РГВ (рис. 2) міських територій на прикладі м. Харків без врахування дії евапотранспірації на перспективу 50 років вказує, що на 1-й рік підйом рівня складе 0,03 м, а на 50-й рік – вже 1,5 м. З метою оптимізації водного балансу підземних вод для забезпечення екологічної безпеки підтоплених територій великого міста, було проведено балансування видаткових та прибуткових статей. Балансування відбувається при зниженні додаткового живлення в 2,4 рази, тобто додаткове живлення необхідно зменшити в середньому на 240 000 м³/добу, а також при збільшенні водовідбору з першого від поверхні водоносного горизонту в середньому в 15 разів, тобто при збільшенні водовідбору в межах м. Харків в середньому на 300 000 м³/добу. На збільшення водовідбору необхідно витратити 24 000 кВт·ч, що відповідає 48 тис. грн/доб. Оскільки якість ґрунтових вод у м. Харків невисока, розрахований об'єм води може бути використаний для технічних цілей або обводнення річок.

Також зроблено прогноз зміни РГВ із урахуванням дії евапотранспірації (рис. 3) на перспективу 50 років. Під штучними покриттями на 1-й рік підйом рівня складе 0,05 м, а на 50-й рік – вже 2,56 м. На території, вільній від штучних покриттів РГВ буде стабілізований дією евапотранспірації. Таким чином, поширення площі штучних покриттів по території міста сприятиме зниженню дії евапотранспірації і стійкому підвищенню РГВ та розвитку підтоплення [1].

Оцінка адекватності моделі

Оцінка адекватності моделі проводилась на двох різних за ландшафтними умовами ділянках. Перша ділянка переважно розташована посеред приватного сектору, та має вільну від покриттів поверхню. Друга ділянка практично повністю вкрита штучними покриттями.

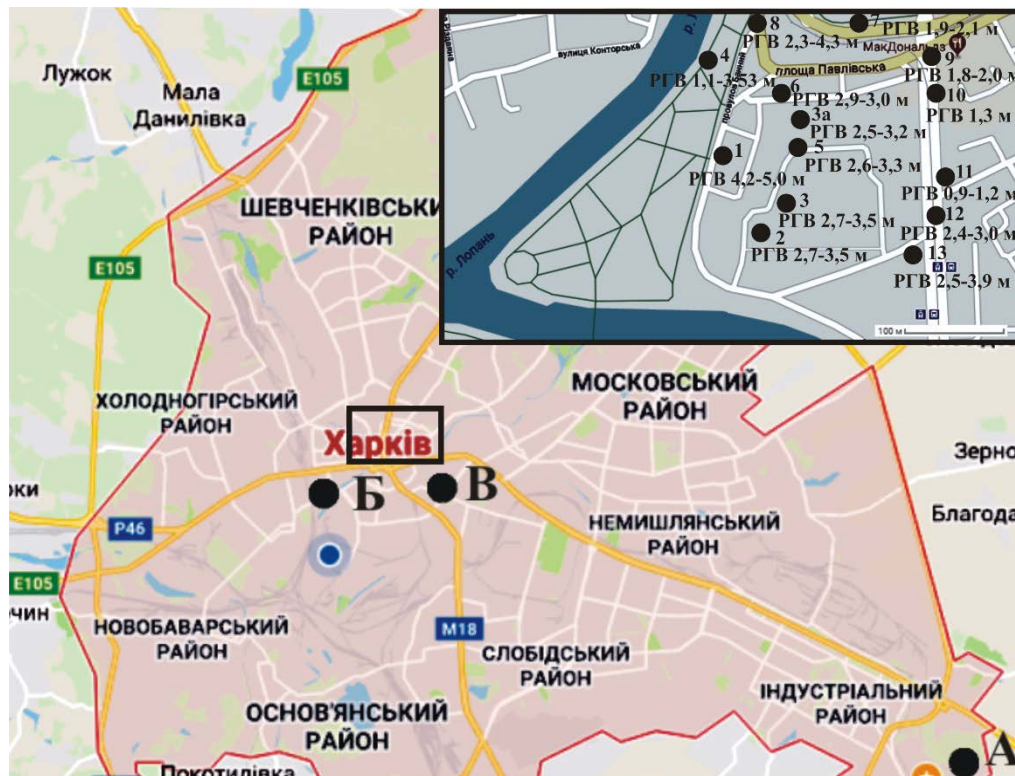


Рис. 4. Пункти спостереження за РГВ за період з 1965 по 2017 рр. (у прямокутнику винесено дані спостережень за РГВ УкрНДІНТІЗ).

Розташування постів спостережень та точки контролю за РГВ, що розглядаються в роботі, надано на рис. 4. Точки А, В, В – режимні водопункти державної спостережної мережі у м. Харків, і спеціальні спостережні пункти Українського головного виробничого НДІ інженерно-технічних та екологічних вишукувань (УкрНДІНТІЗ) для моніторингу зміни РГВ, в яких проводились вимірювання [19, 20].

Таблиця 1
Порівняння моніторингових даних з прогнозованими щодо зміни РГВ

№ точки	Фактична глибина РГВ	Абс. відм. устя, м	Рік дослідження, р.	Кількість років дослідження	Фактична зміна РГВ, м	Зміна РГВ на моделі без врахування дії евапотранспірації, м	Зміна РГВ на моделі із врахуванням дії евапотранспірації, м
2	2,7-3,5	103,08	1978	38	1,4-2,2	2,08	1,25
10	1,3	103,4	2016				
1	4,2-5,0	99,7	1965	36	1,6-1,7	1,97	1,45
5	2,6-3,3	100,05	2001				
8	2,3-4,3	100,0-102,32	1993	8	-0,6-1,3*	0,44	-0,27-0,23
6	2,9-3,0	101,4	2001				
А	5,10		2004	13	-0,3*	Неможливо врахувати	-0,40*
	5,40		2017				
В	2,37		2004	13	-0,45*	Неможливо врахувати	-0,45*
	2,82		2017				

* – РГВ знизився.

Точки *A*, *B*, *B* на ділянці, що розглядається, знаходяться посеред приватного сектору, де більша частина території незабудована та озеленена, що сприяє інтенсифікації процесу евапотранспірації. Зміна РГВ за багаторічний період в свердловинах на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» (точка *A*), на вул. Конторській (раніше Червоножовтнева, точка *B*) та на вул. О. Невського (точка *B*) наведена на рис. 4.

Порівняння моніторингових даних з прогнозованими щодо зміни РГВ наведені в табл. 1.

Порівняння результатів моделювання та даних натурних спостережень вказує на адекватність створеної моделі фактичним даним, що надані у таблиці 1. Врахування дії евапотранспірації дозволяє робити більш точний прогноз зміни РГВ. Отже, дія евапотранспірації стабілізує та знижує РГВ (точки *A*, *B*). А на територіях, вкритих штучними покриттями (точки 1, 2, 3, 5, 6, 8, 10) дія евапотранспірації неможлива, тому відбувається підйом РГВ.

Висновки

Вперше розроблено математичну модель зміни рівня ґрунтових вод, що водночас враховує вплив штучних покриттів та евапотранспірацію. На прикладі міста Харкова розроблено прогнозний варіант максимального підвищення рівня ґрунтових вод в умовах природно-техногенних геосистем великих міст. Запропоновано заходи щодо оптимізації балансу ґрунтових вод завдяки врахуванню впливу техногенних факторів на ґрунтові води.

Проведено оцінку адекватності запропонованої математичної моделі за фактичними даними моніторингу рівня ґрунтових вод. Результати розрахунків на моделі визначили добре узгодження між розрахунковими та фактичними значеннями моніторингу рівнів підземних вод. Це свідчить про адекватність створеної математичної моделі реальним природним умовам.

Список використаної літератури

1. Серікова О. М. Прогнозування і управління рівнем ґрунтових вод для підвищення екологічної безпеки забудованих територій України: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 21.06.01. Суми, 2019. 24 с.
2. Ксенофонов Б. С., Таранов Р. А., Козодаєв А.С., Воропаєва А.А., Виноградов М. С., Сенік Е. В. Проблемы подтопления и затопления селитебных территорий: возможные пути решения. *Безопасность жизнедеятельности*. 2015. № 7 (175). С. 23–27.
3. Ященко К. В., Алхаттер С. Регулирование уровня грунтовых вод для охраны земель от подтопления и иссушения. *Научное обеспечение агропромышленного комплекса*: материалы IX Всероссийской конференции молодых ученых (Россия, г. Краснодар, 24-26 ноября 2015 г.). Краснодар, 2015. С. 908–909.
4. Щербак О. В., Яковлев Є. О., Долін В. В. Моделювання гідрогеофільтраційного поля ґрунтових вод у зоні впливу металургійного виробництва. *Мінеральні ресурси України*. 2018. № 3. С. 19–25.
5. Сологаєв В. И., Парфентьев О. А. О мониторинге подтопления территорий городов и сельских поселений на примере пятиэтажного кирпичного здания. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2016. № 2 (22). С. 127–133.
6. Chebanov O., Zadniprovska A. Zoning groundwater flooding risks in the cities and urban agglomeration areas of Ukraine. *Risk in Water Resources Management. Proceedings of the Symposium H03 held during IUGG 2011 (Australia, Melbourne, July 2011)*. Melbourne, 2011. P. 71–76.

7. Jha A. K., Bloch R., Lamond J. Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century. The World Bank. Washinton DC. 2012. 638 p.
8. Bob M., Rahman N., Elamin A., Taher S. Rising Groundwater Levels Problem in Urban Areas: A Case Study from the Central Area of Madinah City. Saudi Arabia. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2016. Vol. 41, Issue 4. P. 1461–1472.
9. Jiang Y., Zevenbergen C., Ma Y. Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China's challenges and "sponge cities" strategy. *Environmental Science and Policy*. 2018. Vol. 80. P. 132–143.
10. Environment Agency, Management of the London Basin Chalk Aquifer. Status Report 2018 of Environment Agency. 2018. 38 p. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/735451/2018_Final.pdf
11. Абрамов С. К., Дзекцер Е. С., Гавшина З. П. Факторы подтопления территорий промышленных предприятий и меры борьбы с ними. *Промышленное строительство*. 1971. № 1. С. 21–32.
12. Чебанов А. Ю. Поиск эффективных решений проблемы подтопления городов. *Коммунальное хозяйство городов*. 2002. № 47. С. 133–138.
13. Стрижельчик Г. Г. Концептуальные вопросы борьбы с подтоплением городских территорий. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 24–27.
14. Телима С. В. Прогнозування процесів підтоплення міських територій та промислово-міських агломерацій в сучасних умовах. Методи і методика досліджень. *Містобудування та терит. планує*. 2005. Вип. 22.. С. 367–378.
15. Яцик А. В. Подтопления земель в Україні. *Вопросы химии и химической технологии*. 2002. № 5. С. 292–295.
16. Муфтахов А. Ж. Гидродинамические основы прогноза подтопления промплощадок и фильтрационные расчеты защитного дренажа в сложных гидрогеологических условиях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : Москва, 1975. 44 с.
17. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. Mathematical Model of Dangerous Changing the Groundwater Level in Ukrainian Industrial Cities. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*. USA. 2015. Vol. 1, №. 2. P. 86–90.
18. Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А., Яковлев В. В. Математическое моделирование изменения уровней грунтовых вод в городах с учетом ведущих режимобразующих факторов. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2014. № 4 (51). С. 182–191.
19. Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А. Изменение уровня грунтовых вод в городской экосистеме г. Харькова. *Вісник НТУ«ХПИ»*. 2016. № 4 (1176). С.132–137.
20. Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А., Яковлев В. В., Анищенко Л. Я., Писня Л. А. Оценка адекватности предлагаемой математической модели прогноза на фактических данных мониторинга уровня грунтовых вод в центральной части г. Харькова. *ScienceRise*. 2017. №11(40). С. 43–47. DOI: 10.15587/2313-8416.2017.116369

References

1. Sierikova, O. M. (2019). Prohnozuvannia i upravlinnia rivnem gruntovykh vod dlia pidvyshchennia ekolohichnoi bezpeky zabudovanykh terytorii Ukrainy: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 21.06.01. Sumy, 2019. 24 s.
2. Ksenofontov, B. S., Taranov, R. A., Kozodaev, A. S., Voropaeva, A. A., Vinogradov, M. S., & Senik, E. V. (2015). Problemyi podtopleniya i zatopleniya selitebnykh territoriy: vozmozhnyie puti resheniya. *Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti*. 7 (175), 23–27.
3. Yaschenko, K. V., & Alhatter, S. (2015). Regulirovanie urovnya gruntovykh vod dlya ohranyi zemel ot podtopleniya i issusheniya. *Proceedings of the Nauchnoe*

- obespechenie agropromyshlennogo kompleksa: IX Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh.* (Rossiya, g. Krasnodar, 24-26 noyabrya 2015). Krasnodar, pp. 908–909.
4. Shcherbak, O. V., Yakovliev, Ye. O., & Dolin, V. V. (2018). Modeliuvannia hidroheofiltratsiinoho polia gruntovykh vod u zoni vplyvu metalurhiinoho vyrobnytstva. *Mineralni resursy Ukrainy*. **3**, 19–25.
5. Sologae, V. I., & Parfentev, O. A. (2016). O monitoringe podtopleniya territoriy gorodov i selskikh poseleniy na primere pyatietazhnogo kirpichnogo zdaniya. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. **2** (22), 127–133.
6. Chebanov, O., & Zadniprovska, A. Zoning groundwater flooding risks in the cities and urban agglomeration areas of Ukraine. Risk in Water Resources Management. Proceedings of the *Symposium H03 held during IUGG 2011* (Australia, Melbourne, July 2011). Melbourne, pp. 71–76.
7. Jha, A. K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century. The World Bank. Washinton DC.
8. Bob, M., Rahman, N., Elamin, A., & Taher, S. (2016). Rising Groundwater Levels Problem in Urban Areas: A Case Study from the Central Area of Madinah City. Saudi Arabia. *Arabian Journal for Science and Engineering*. **41**, 4, 1461–1472.
9. Jiang, Y., Zevenbergen, C., & Ma, Y. (2018). Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China's challenges and 'sponge cities' strategy. *Environmental Science and Policy*. **80**, 132–143.
10. Environment Agency, Management of the London Basin Chalk Aquifer. Status Report 2018 of Environment Agency. 2018. 38 p. Retrieved from https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/735451/2018_Final.pdf
11. Abramov, S. K., Dzekter, E. S., & Gavshina, Z. P. (1971). Faktoryi podtopleniya territoriy promyshlennykh predpriyatiy i meryi borbyi s nimi. *Promyshlennoe stroitelstvo*. **1**, 21–32.
12. Chebanov, A. Yu. (2002). Poisk effektivnykh resheniy problemy podtopleniya gorodov. *Kommunalnoe hozyaystvo gorodov*. **47**, 133–138.
13. Strizhelchik, G. G. (2003). Kontseptualnyye voprosy borbyi s podtopleniem gorodskikh territoriy. *Ekolohiia dokillia ta bezpeka zhyttiediialnosti*. **6**, 24–27.
14. Telyma, S. V. (2005). Prohnozuvannia protsesiv pidtoplennia miskykh terytorii ta promyslovo-miskykh ahlomeratsii v suchasnykh umovakh. *Metody i metodyka doslidzhen. Mistobuduvannia ta teryt. planuv.* **22**, 367–378.
15. Iatsyk, A. V. (2002). Pidtoplennia zemel v Ukraini. *Voprosy himii i himicheskoy tekhnologii*. **5**, 292–295.
16. Muftahov, A. Zh. (1975). Gidrodinamicheskie osnovy prognoza podtopleniya promploschadok i filtratsionnyie raschetyi zaschitnogo drenazha v slozhnykh gidrogeologicheskikh usloviyah: avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk : Moskva, 1975.
17. Serikova, E., Strelnikova, E., & Yakovlev, V. (2015). Mathematical Model of Dangerous Changing the Groundwater Level in Ukrainian Industrial Cities. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*. USA. **1**, 2, 86–90.
18. Serikova, E. N., Strelnikova, E. A., & Yakovlev, V. V. (2014). Matematycheskoe modelyrovanye yzmeneniya urovnei hruntovykh vod v horodakh s uchetom vedushchykh rezhymoobrazuiushchykh faktorov. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. **4** (51), 182–191.
19. Serikova, E. N., & Strelnikova, E. A. (2016). Izmenenie urovnya gruntovykh vod v gorodskoy ekosisteme g. Harkova. *Visnik NTU«HPI»*. **4** (1176), 132–137.
20. Serikova, E. N., Strelnikova, E. A., Yakovlev, V. V., Anischenko, L. Ya., & Pisnya, L. A. (2017). Otsenka adekvatnosti predlagaemoy matematicheskoy modeli prognoza na fakticheskikh dannykh monitoringa urovnya gruntovykh vod v tsentralnoy chasti g. Harkova. *ScienceRise*. **11** (40), 43–47. DOI: 10.15587/2313-8416.2017.116369